بررسی تجربی و عددی ورق یک و دولایه آلومینیوم ۳۱۰۵ با اتصالات مکانیکی تحت ضربهٔ سقوط آزاد*

آرش بشیری[۱]　　مجتبی حسینی[۲]　　حسین حاتمی[۳]

چکیده ورق‌ها در شاخه‌های متنوعی از صنایع تکنولوژی مدرن از قبیل صنایع خودروسازی، صنایع دریایی، علوم هوا فضا، صنایع اپتیک، صنایع هسته‌ای و مهندسی سازه مورد استفادهٔ زیادی می‌باشند. یکی از مهمترین مشکلاتی که در طراحی وجود دارد ضعف آنها در برابر ضربه می‌باشد. ضربات مختلفی توسط اجسام خارجی، درحین ساخت، کارکرد و یا نگهداری سازه به آن وارد می‌شود، به همین جهت مقاوم‌سازی و افزایش استحکام ورق‌ها در برابر ضربه، بخش وسیعی از مطالعات پژوهشگران را تشکیل داده است. این مطالعه برای سه سطح انرژی ضربه (سه ارتفاع سقوط آزاد) انجام گرفته است. ورق‌های مورد استفاده از جنس AL3105 و با ابعاد ۲۲۰*۲۳۰ میلی‌متر و با ضخامت ۱ و ۲ میلی‌متر روی هم قرارگرفته و توسط پیچ و مهره به‌هم متصل می‌شوند. ورق‌ها به‌صورت کاملاً آزاد بر روی فیکسچر قرار می‌گیرند. جنس پیچ‌ها از نوع پیچ با استاندارد din933 می‌باشد. در روش تجربی شتاب ضربه‌زننده توسط سنسور شتاب‌سنج اندازه‌گیری شده و تغییرشکل ماندگار ورق پس از اتمام ضربه اندازه‌گیری می‌شود. پارامترهای مورد ارزیابی شامل مقدار شتاب ضربه بر روی ورق، میزان تغییرشکل ماندگار و مقدار جذب انرژی برای ورق‌ها می‌باشد. برای مدل‌سازی عددی از نرم‌افزار المان محدود آباکوس استفاده شده است. مقایسهٔ نتایج حاصل از روش تجربی و عددی نشان می‌دهد که این دو روش تحقیق دارای نتایج نزدیک به‌هم می‌باشند. همچنین نتایج نشان می‌دهد که جذب انرژی در ورق‌های یک‌لایه بیشتر از ورق‌های دولایه است، همچنین شتاب در ورق‌های دولایه بیشتر از ورق‌های یک‌لایه می‌باشد.

واژه‌های کلیدی ورق آلومینیومی، آزمایش سقوط آزاد، تغییرشکل ماندگار، شتاب ضربه، جذب انرژی.

Experimental and Numerical Analysis of Single and Double layered Aluminum Sheet 3105 With Mechanical Joints under Drop Weight Impact

A. Bashiri　　M. Hosseini　　H. Hatami

Abstract *Sheets are widely used in various branches of modern technology industries such as automotive, marine, aerospace, optics, nuclear industries and structural engineering. One of the most important problems in design is their weakness against impact. Various impacts are applied by external objects during construction, operation or maintenance of the structure. For this reason, the reinforcement and increased strength of the sheets against the impact is the subject of many studies of researchers. This study was conducted for three levels of impact energy (using Drop weight). The sheets are of AL3105, with dimensions of 220 * 230 mm and 1 millimeter thick, 2 millimeters thick, and are connected by bolts. The sheets are completely free on the fixture The screws are made of a bolt with Standard din933. In the experimental method, the picker acceleration has been measured by the accelerometer sensor and the permanent deformation of the sheet is measured at the end of the impact. The parameters to be evaluated include the impact acceleration on the sheet, the permanent deformation and the energy absorption of the sheets. Abaqus finite element software has been used for numerical modeling. Comparing the results of experimental and numerical methods shows that these two research methods have a good agreement. The results also show that the absorption of energy in single-layer sheets is greater than double-layered sheets. Also the acceleration in double-layered sheets are more than single-layer sheets.*

Key Words Aluminum sheet, Free fall test, Permanent displacement, Shock acceleration, Energy absorption

---

*تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۱۱/۱۹ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/٦/۲۷ می‌باشد. DOI:10.22067/fum-mech.v30i2.79107

(۱) کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، لرستان، ایران

(۲) دانشیار، گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، لرستان، ایران

(۳) نویسندهٔ مسئول: استادیار، گروه مکانیک، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه لرستان، خرم آباد، لرستان، ایران hatami.h@lu.ac.ir

مقدمه

ورق‌ها به‌عنوان ساده‌ترین نمونه و معمولی‌ترین المان‌های سازه‌ای هستند که در بسیاری از کاربردهای مهندسی مانند بدنهٔ خودروها، بدنهٔ بال هواپیما، موشک‌ها، بدنهٔ کشتی‌ها و زیردریایی‌ها و غیره مورد استفاده قرار می‌گیرند. از آنجا که این ورق‌ها در مواد مختلفی تحت بارهای دینامیکی و ضربه‌ای قرار می‌گیرند، قوانین تماس محاسبه‌شده به روش‌های استاتیکی را می‌توان در تحلیل‌های دینامیکی نیز به‌کار برد. محققان زیادی مرحلهٔ بارگذاری فرآیند فرورفتگی را تحلیل کرده، قانون تماس مناسبی را برای تیرها و صفحات دارای شرایط مرزی مختلف و نیز ضربه‌زننده‌هایی با شکل‌های مختلف ارائه کرده‌اند که در زیر به مرور اجمالی پژوهش‌های انجام گرفته پرداخته می‌شود. قیان و سوانسون [1] دو راه حل متفاوت را برای پدیدهٔ ضربه بر سازه‌های کامپوزیتی مطالعه کردند. آنها دو روش ریلی –ریتز با انتگرال‌های عددی نسبت به زمان و یک روش تحلیلی بااستفاده‌از تبدیل لاپلاس با معادلات دیفرانسیل حاکم را مورد تحقیق قرار داده و پاسخ‌ها را با محاسبات المان محدود و اندازه‌گیری عددی مقایسه و نمودارهای نیروی تماس تنش، خیز مرکز ورق را در نقطهٔ تماس نسبت به زمان اعمال ضربه بررسی کردند. نتایج نشان داد که روش‌های حل ارائه شده از دقت قابل‌قبولی برخوردار است. هر و لیانگ [2] با استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود اثر ضربه را بر ورق‌های کامپوزیتی چندلایه با ضربه‌زنندهٔ سرعت پایین و دو نوع شرط مرزی ساده و تمام‌گیردار بررسی کردند. آنها برای محاسبهٔ نیروی تماسی از قانون ضربهٔ اصلاح‌شدهٔ هرتز استفاده کردند و تأثیر پارامترهایی نظیر سرعت ضربه‌زننده، سفتی تماسی و شرایط مرزی در ضربهٔ اعمالی بر سازه را تحقیق کردند. کاپرینو و همکارانش [3] رفتار ضربه با سرعت پایین در ورق کامپوزیتی با لایهٔ فلزی را که از لایه‌های آلومینیوم در بین لایه‌های فایبرگالاس استفاده شده، بررسی کردند. آنها با انجام آزمایش ضربه ثابت نمودند که مقاومت ورق‌های کامپوزیتی لایه فلزی فایبرگالاس–آلومینیوم نسبت به ورق‌های الیاف کربن و الیاف فایبرگالاس درپاسخ نفوذ ضربه بهتر است. همچنین استفاده از آلیاژهای آلومینیوم به جای این فلز از پدیدهٔ نفوذ ضربه در ورق می‌کاهد. روی و گینسون [4] تأثیر یک بار نقطه‌ای هارمونیک را بر یک ورق مربعی یک‌سرگیردار که دارای ضخامت‌های مختلف و شکل ظاهری متفاوت می‌باشند، روی دامنهٔ ارتعاشی و تنش‌های خمشی دینامیکی از روش آنالیز المان محدود و بااستفاده‌از یک المان خمشی چهار نقطه‌ای ورق بررسی نمودند. آنها نشان دادند که کاهش در دامنهٔ ارتعاش و یا تنش‌های خمشی و برشی با انتخاب درست و مناسب ضخامت به‌دست می‌آید. صبوری و همکاران [5] مقاومت سوراخ‌شوندگی پانل‌های کامپوزیتی الیاف شیشه –اپوکسی در برابر ضربهٔ پرتابه با سرعت بالا براساس مطالعهٔ آزمایشگاهی و استفاده از نرم‌افزارهای المان محدود انسیس به‌عنوان حل عددی، بررسی نمودند. آنها با قرار دادن فلز آلومینیوم با ضخامت‌های متفاوت در لایه‌های مختلف کامپوزیت میزان جذب انرژی ضربه‌ای را در ورق‌های الیاف –فلز تحقیق کردند. بر این اساس تطابق قابل‌قبول بین حل عددی و نتایج آزمایشگاهی اتخاذ شد. کیتادا [6] به بررسی استحکام و شکل‌پذیری نهایی پایه‌های پل فولادی پر از بتن در ژاپن پرداخت. در این تحقیق سه نوع پایهٔ پل فلزی مربع‌شکل، با سخت‌کننده‌های طولی داخلی و پرشده با بتن مورد بررسی قرار گرفت و مشاهده شد که سخت‌کننده‌ها و همچنین بتن باعث افزایش استحکام، مقاومت و انعطاف‌پذیری پل می‌شود. اولسن [7] تأثیر اعمال ضربه با سرعت پایین بر روی ورق کامپوزیتی شیشه/اپوکسی و لایه‌ها با زاویهٔ الیاف را به‌صورت آزمایش و حل المان محدود بررسی نمود. تست ضربه با ضربه‌زننده به جرم‌های کوچک و بزرگ انجام شد و نتایج کار با نرم‌افزارهای المان محدود

مقایسه گردید. از سه ورق با اندازه‌های متفاوت و دارای شرایط مرزی گیردار استفاده شد. تحقیق وی جهت محاسبهٔ تنش و نیروی تماسی ورق کامپوزیتی در طول زمان اعمال ضربه انجام شده است. او نشان داد که نیروی تماس برای سه ورق، متفاوت می‌باشد. اوستا و همکاران [8] اثر ضخامت و انحنا روی رفتار ضربهٔ پانل‌های کامپوزیتی را بررسی کردند. در این مطالعه رفتار ضربهٔ با سرعت بالا روی پانل‌های مسطح و انحنادار به‌روش عددی مورد ارزیابی قرار گرفت. زهانگ و همکاران [9] یک مدل المان محدود مؤثر برای پیش‌بینی آسیب برخورد سرعت پایین در کامپوزیت‌های چندلایه بااستفاده‌از مدل بارگذاری شبه‌استاتیک با تماس پیوسته ارائه دادند و تأثیر تنش فشاری در سرتاسر ضخامت ورق روی میزان لایه‌لایه‌شدگی را به‌وسیلهٔ ارائهٔ نیروی اصطکاک تماسی در جهت نیروی برشی محاسبه کردند. آنها شروع و انتشار آسیب در یک ورق کامپوزیت با لایه‌چینی $[90_3/0_3]s$ را شبیه‌سازی کردند و نتایج عددی به‌دست‌آمده در ترم‌های موقعیت، شکل و اندازهٔ آسیب تطابق خوبی با مشاهدات تجربی داشت. با بررسی تحلیل تنش در صفحات نمونه‌ها نشان داده شده است که با لایه‌چینی بیشتر ورق‌ها بر اثر اصطحکاک بیشتر، تنش بیشتری ایجاد می‌گردد.

چوبینی و همکاران [10] بررسی تجربی و عددی در مورد جذب انرژی و تغییرشکل لوله‌های جدار نازک توخالی و توپر با هندسهٔ مقاطع دایره و مربع تحت بار ضربه‌ای عرضی انجام دادند. هدف از این تحقیق بررسی اثر تغییرشکل هندسی برای لولهٔ آلومینیومی بر میزان جذب انرژی و بررسی اثر وجود فوم درون آن برای جذب انرژی بیشتر ناشی از ضربهٔ عرضی بیان گردیده است. سیراکفسکی [11] اهمیت تأثیر لایه‌چینی را بر روی مقاومت ضربه‌ای چندلایه‌ها، مطالعه کرد. از آنجایی که در یک چندلایهٔ تک‌جهته، کلیهٔ الیاف در جهت یکسانی قرار گرفته‌اند، پدیدهٔ لایه‌لایه‌شدن رخ نمی‌دهد. برای دو صفحه با ضخامت یکسان اما با لایه‌چینی متفاوت، صفحه‌ای که اختلاف زاویهٔ مابین دولایهٔ متوالی آن بیشتر است، ناحیهٔ لایه‌لایه‌شدن درآن بزرگتر خواهد بود. بیدی و همکاران [12] اثر افزودن نانو رس بر قابلیت جذب انرژی ورق‌های دولایهٔ فولاد–پلی‌اوریا را تحت بار ضربه‌ای بررسی کردند. نمونه‌های دولایهٔ فولاد–پلی‌اوریا و فولاد نانوپلی‌اوریا تهیه و مورد آزمایش کشش ساده و ضربهٔ سقوط آزاد قرار گرفتند. آزمایش کشش نشان می‌دهد که با افزودن ذرات نانو مدول الاستیک حدود ۶۰ درصد افزایش و افزایشِ طول قبل از شکست نیز حدود ۷ درصد کاهش می‌یابد. نتایج این تحقیق نشان داد که افزودن نانورس به مادهٔ پلیمری مقدار جذب انرژی را حدود ۳ درصد افزایش داده و حداکثر تغییرشکل ماندگار در اثر ضربه در قطعه را نیز حدود ۷ درصد کاهش می‌دهد. اوسلن [13] با بررسی تئوری و تجربی ورق‌های کامپوزیتی ساندویچی نشان داد که قانون برخورد هرتز برای پانل‌های ساندویچی درست نبوده و باید اصلاح گردد. وی نتیجه گرفت که رفتار نیرو -تغییرشکل در پانل‌های ساندویچی تحت بار ضربه‌ای تقریباً خطی است و بهتر است به‌علت تغییرشکل زیاد رویهٔ بالایی، از کرنش‌های محدود و غیرخطی استفاده گردد و مسئلهٔ غیرخطی بودن هندسی لحاظ شود. چوی وهونگ [14] روش جدیدی را برای به‌دست‌آوردن توزیع نیروی ضربه در زمان برخورد برحسب زمان ارائه دادند. ایشان ورق را نازک گرفته و از انرژی برخورد (به‌علت تغییرشکل کم موضعی) صرف‌نظر کردند و از مدل جرم و فنر و قانون بقای ممنتوم استفاده کردند. آنها به‌کمک آنالیز مقادیر ویژه و استفاده از آنالیز مودال توزیع نیروی ضربه را به‌دست آوردند

بررسی‌های زیادی روی بارگذاری ضربه‌ای و چرخه‌ای روی نمونه‌های جدار نازک فولادی انجام شده است [19-15]. در این مقاله روی ورق‌های

جدارنازک چندلایه تحت بارگذاری ضربه‌ای تحلیل تنش و تغییرشکل انجام شده است.

آزمایش

نمونه‌های آزمایش. برای انجام آزمایش ضربه از ورق آلومینیوم ۳۱۰۵ تخت استاندارد به‌ضخامت ۱ میلی‌متر استفاده شده است. ابعاد کلی ورق‌ها به اندازهٔ ۲۲ × ۲۳ سانتی‌متر می‌باشد که باتوجه‌به نحوهٔ قرارگیری روی تکیه‌گاه‌ها، ابعاد مفید این ورق‌ها ۲۱ ×۲۲ سانتی‌متر است. ورق‌ها به‌وسیلهٔ پیچ و مهره به‌هم متصل می‌شوند و فاصلهٔ مرکز پیچ تا لبه ورق از هر طرف ۲/۵سانتی‌متر است. باتوجه‌به این‌که سه ارتفاع سقوط مد نظر است، شش سری نمونهٔ آزمایش شامل نمونه‌های یک‌لایه و دولایه خواهیم داشت که برای هر کدام سه نمونه برای بررسی خطا در نظر گرفته شده است که در مجموع ۱۸ نمونه آزمایش می‌باشند. در این مقاله برای نام‌گذاری ورق‌ها از عبارت AL که مخفف کلمه Aluminum است استفاده شده است، در جدول (۱) ورق‌های مورد استفاده معرفی شده‌اند و در شکل (۱) ورق یک‌لایه و دولایه نمایش داده شده است.

مشخصات مکانیکی ورق‌ها و پیچ‌ها

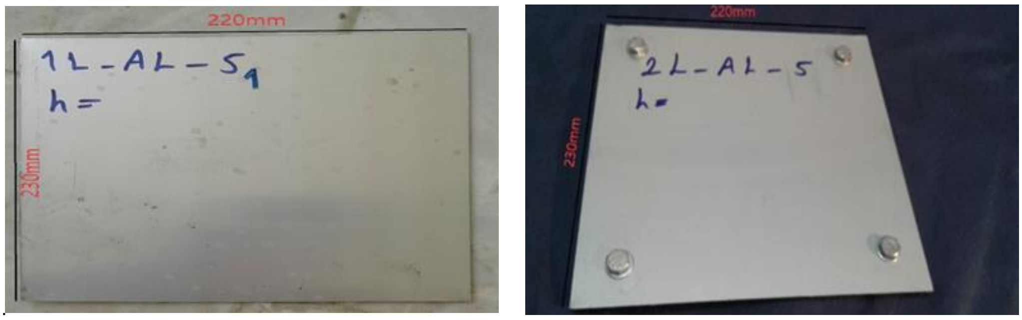
برای تعیین خواص مکانیکی ورق فولادی مورد آزمایش سه نمونهٔ آزمایشگاهی طبق استاندارد ASTME8 برش داده شده و مورد آزمایش کشش قرار گرفته است. از نتایج حاصل از این آزمون خصوصیات الاستیک و پلاستیک فولاد مصرفی شامل مدول الاستیک (یانگ)، نقطهٔ تسلیم، استحکام و کرنش نهایی از روی نمودار تنش- کرنش حاصل‌شده، به‌دست می‌آید.

برای نمونه‌های آزمایشگاهی به‌شکل ورق، برای انجام آزمون کشش لازم است که نمونه‌هایی به‌شکل دمبل آماده‌سازی شوند. در شکل (۲) نمونه‌های این آزمایش نشان داده شده‌اند.

دستگاه تست کشش ۵ تنی ساخت کشور تایوان و مربوط به شرکت GOTECH می‌باشد. نمودار تنش- کرنش حاصل از این آزمایش در شکل (۳) نشان داده شده است.

جدول ۱ معرفی ورق‌های مورد استفاده

نمونه	1L-AL3105	1L-AL3105	1L-AL3105	2L-AL31052	2L-AL3105	2L-AL3105
ارتفاع سقوط	۵cm	۷cm	۹cm	۵cm	۷cm	۹cm

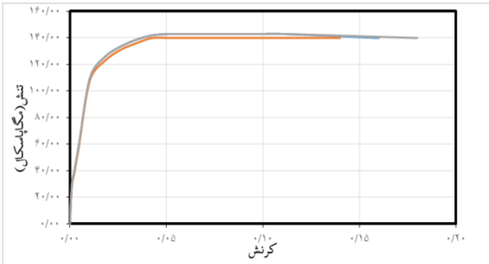


(الف) (ب)

شکل ۱ نمای ورق‌های آلومینیومی. (الف) یک‌لایه، (ب) دولایه



شکل ۲ نمونه‌های تست کشش برای تعیین مشخصات مکانیکی ورق آلومینیومی



شکل ۳ نمودار تنش-کرنش حاصل از تست کشش

همچنین در جدول (۲) مشخصه‌های مهم مکانیکی آلومینیوم مصرفی همچون مقاومت تسلیم، مدول یانگ و تنش و کرنش ارائه گردیده است.

برای متصل‌کردن ورق‌ها از پیچ‌های کلاس 5.6 استفاده شده است که به پیچ آهن معروف هستند و همراه مهرهٔ کلاس 5 یا 5 به بالا بسته می‌شوند، در دستگاه‌های DIN طبق DIN 931 به‌صورت نیم‌دنده و DIN933 به‌صورت تمام‌دنده تولید می‌شوند. این کلاس از پیچ و مهره‌ها در ساختار مفتولشان کربن کمتری نسبت به کلاس‌های بالاتر دارند، از نظر انعطاف بهتر هستند اما استقامت کمتری دارند، هر میلی‌متر از سطح مقطع این پیچ قادر به تحمل بار ۵۰ کیلوگرم است و تا ٦۰ کیلوگرم بار وارد شده نیز بدون تغییرشکل باقی می‌مانند. باتوجه‌به این‌که در این پروژه از قطر ۸ میلی‌متر استفاده شده درنتیجه مساحت سطح مقطع پیچ ۳۲/۸۲ میلی‌متر مربع و مقاومت کششی آن ٤۹۰ نیوتن بر میلی‌متر مربع است. در جدول (۳) مشخصات کارخانه‌ای و مکانیکی پیچ و مهره آورده شده است، همچنین در شکل (٤) تصویر پیچ و مهره را مشاهده می‌کنید.

فیکسچر

برای نگه‌داشتن نمونه‌ها و ایجاد تکیه‌گاه مناسب از فیکسچر نگهدارنده استفاده شده است. این نوع فیکسچر باعث ایجاد قید روی ورق نمی‌گردد و ورق روی فیکسچر آزاد می‌باشد. در شکل (۵) نمای فیکسچر مورد استفاده در این تحقیق نشان داده شده است.

جدول ۲ مشخصات مکانیکی آلومینیوم ۳۱۰۵

جرم حجمی (kg/m^2)	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ضریب پوآسون
۸۰۰۲	۸۱	۱۲٦	۱٤۳	۰/۳۳

جدول ۳ مشخصات مکانیکی پیچ و مهره

جرم حجمی (kg/m^2)	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ضریب پوآسون
۷۸۵۰	۲۰۰	٤۲۰	۵۰۰	۰/۳



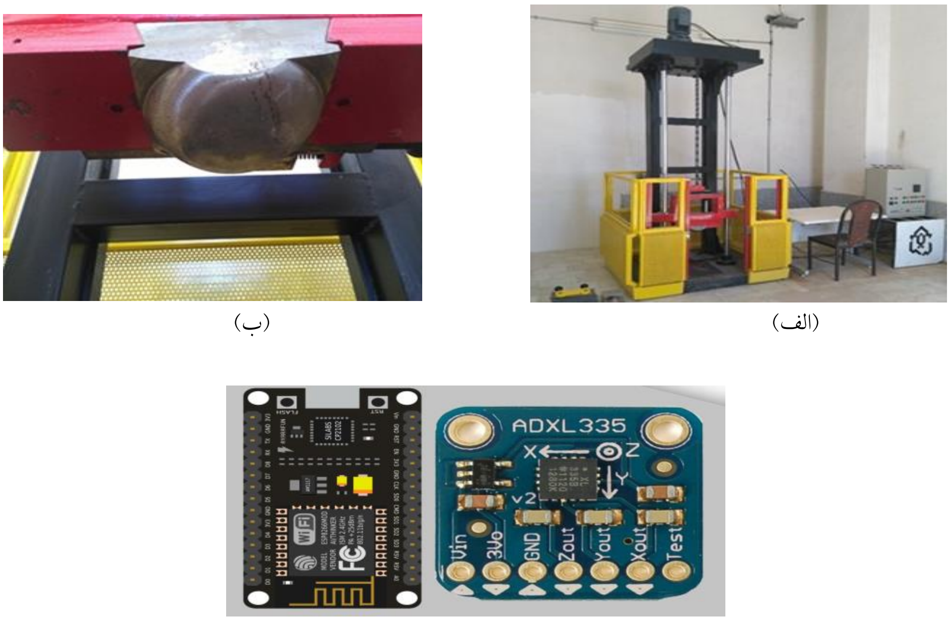
شکل ٤ پیچ و مهره کلاس 5.6



شکل ٥ نمای فیکسچر

دستگاه آزمایش تست ضربه و شتاب‌سنج

دستگاه مورد استفاده برای آزمایش ضربه در این پژوهش، دستگاه تست سقوط آزاد (دراپ همر) ۷۵۰۰ ژول (DH – TM 7500 J) می‌باشد. حداکثر ارتفاع قابل تنظیم این دستگاه ۳ متر می‌باشد و جرم ضربه‌زننده برای این تحقیق ۱۸۰ کیلوگرم انتخاب شده است و تا ۲۲۰ کیلوگرم قابل تنظیم می‌باشد. این دستگاه از قسمت‌های مختلفی تشکیل شده است که عبارت‌اند از قسمت کنترل مرکزی دستگاه، سیستم اندازه‌گیری و ضبط اطلاعات، موتور، پایه‌های نگهدارندهٔ ضربه زننده، وزنه‌های ضربه‌زننده، سره ضربه‌زننده (عرقچین). در شکل (٦) تصویری از دستگاه دارپ همر و سره ضربه‌زننده و همچنین سنسور شتاب‌سنج دستگاه نشان داده شده است. از سنسور شتاب‌سنج که بر روی ضربه‌زننده قرار می‌گیرد، داده‌گیری می‌شود و پردازش داده توسط شتاب‌سنج با دقت اندازه‌گیری میکروثانیه انجام می‌شود و نتایج را به‌صورت وای‌فای به سیستم انتقال می‌دهد و نتایج توسط نرم‌افزاری که با کدنویسی پایتون نوشته شده است، به‌صورت منحنی شتاب–زمان نمایش داده می‌شود. در جدول (٤) خواص مکانیکی سرهٔ ضربه‌زننده بیان شده است. برای ثبت تاریخچهٔ شتاب از لحظهٔ شروع تماس ضربه‌زننده با نمونه‌ها، از سنسور شتاب‌سنج که بر روی ضربه‌زننده قرار می‌گیرد، استفاده شده است.



(الف)   (ب)

(ج)

شکل ٦ دستگاه دراپ همر. (الف) نمای کلی، (ب) سرهٔ ضربه‌زننده.(ج) سنسور شتاب‌سنج

جدول ٤ مشخصات مکانیکی سرهٔ ضربه‌زننده

جرم حجمی (kg/m^3)	مدول یانگ (GPa)	تنش تسلیم (MPa)	تنش نهایی (MPa)	ضریب پوآسون
۷۸۵۰	۲۰۰	٤۲۰	۵۰۰	۰.۳

نتایج آزمایش تجربی

نتایج حاصل از این تحلیل به‌صورت نمودارهای شتاب-زمان حاصل از دستگاه شتاب‌سنج می‌باشد. همچنین تغییرشکل ماندگار هر ورق به‌عنوان دیگر پارامتر مهم در بررسی عملکرد ورق‌ها، پس از پایان فرآیند ضربه، اندازه‌گیری شده است. در جدول (۵) ماکزیمم شتاب ایجاد شده در هر ورق و همچنین تغییرشکل ماکزیمم آنها نمایش داده شده است. همان‌طور که قابل پیش‌بینی بود، با افزایش انرژی ضربه‌زننده ناشی از افزایش ارتفاع سقوط، شتاب وارده و همچنین تغییرشکل ماندگار در هر دو ورق افزایش پیدا می‌کند. جذب انرژی در ورق‌های دولایه کمتر از یک‌لایه است؛ همچنین تغییرشکل در ورق زیرین به هر شکلی که باشد در ورق‌های بالایی نیز به همان شکل است و این مفهوم را می‌رساند که پیچ‌ها تغییرشکل را به ورق‌های بالاتر انتقال می‌دهند بدون اینکه ورق‌ها از هم جداشوند. برای نمونه‌های با ارتفاع ۵، ۷ و ۹ سانتی‌متر، یک‌لایه درمقایسه با دولایه تغییرشکل ماندگار را به‌ترتیب ۲۰، ۱۰ و ٦۸ درصد کاهش می‌دهد. در شکل (۱۰-۷) الگوی تغییرشکل ورق‌های یک‌لایه و دولایهٔ نمونه نشان داده شده است.

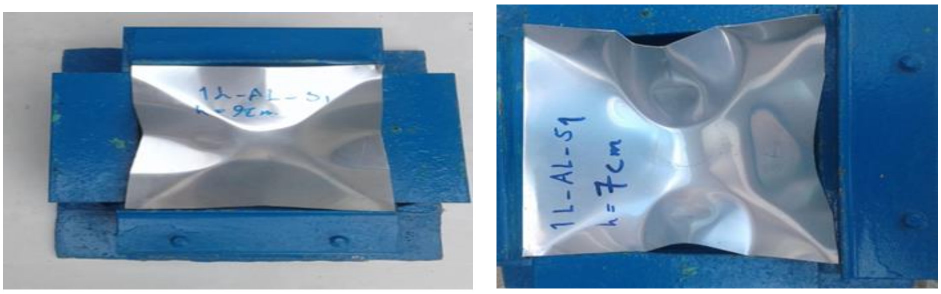
مدل‌سازی عددی مدل هندسی و مش‌بندی مصالح

برای فراهم کردن نشیمن مناسب برای ورق‌ها و با توجه به نوع تکیه‌گاه‌ها از فیکسچر استفاده شده است. مدل‌سازی این فیکسچر به‌صورت مدل جامد سه‌بعدی که از ۸٦ عدد المان سه‌بعدی ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با نام C3D8R استفاده شده است. ابعاد هندسی ورق‌ها در مدل عددی به‌صورت مربع ۲۲×۲۲ سانتی‌متر با ضخامت ۱ میلی‌متر می‌باشد. برای مدل-سازی این عناصر از مدل جامد سه‌بعدی و از نوع تغییرشکل‌پذیر (Deformable) استفاده شده است. برای مش‌بندی ورق‌ها از تعداد ۹۰۰ عدد المان سه‌بعدی ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با نام C3D8R استفاده شده است. همچنین با پارتیشن‌بندی (قسمت‌بندی قطعات به اجزای ساده‌تر برای رسیدن به مشی با کیفیت و الگوی مناسب) مش بهینه درنظرگرفته شده است. در ورق‌های دولایه برای اتصال ورق‌ها بر روی هم از پیچ و مهره استفاده شده است، که از سه قسمت سرپیچ، تنهٔ پیچ و مهره تشکیل شده است. همچنین نحوهٔ تماس پیچ‌ها با ورق‌ها به‌صورت اتکایی می‌باشد. سرپیچ و مهره از ۷۲ المان و تنه پیچ از ۹٦ المان سه‌بعدی ۸ گرهی با انتگرال‌گیری کاهش‌یافته با نام C3D8R استفاده شده است. که این سه قسمت با استفاده از قابلیت Tie به یکدیگر متصل شده است. این قابلیت اتصال کامل و بدون لغزشی بین سطوح در تماس با هم ایجاد می‌کند و ضریب اصطکاک بین لایه‌ها و فیکسچر برابر با ۰/۲ می‌باشد. ضمنا تنها سر ضربه‌زننده که در تماس با ورق قرار می‌گیرد، مدل شده است. این المان نیمی از کرهٔ بیضوی‌شکل می‌باشد. به‌علت سختی بسیار زیاد آن نسبت به ورق‌های فولادی آزمایش، از نوع مصالح صلب، (Discrete rigid)، در نظر گرفته شده است. این عضو در ابتدا به‌صورت جامد سه‌بعدی مدل شده است و در ادامه برای کاهش المان‌های مورد نیاز برای مش‌بندی، با استفاده از قابلیت تبدیل المان جامد به المان پوسته، فقط جدارهٔ بیرونی آن نگه داشته شده است.

بدین‌صورت تعداد المان‌های کل آن برابر بـا ۸۵٦ عـدد و از نوع R3D4 می‌باشد. شـکل (۱۱) تصـاویر مربـوط به مش‌بندی و مدل نهایی یک‌لایه و دولایـه را نمـایش می‌دهد.

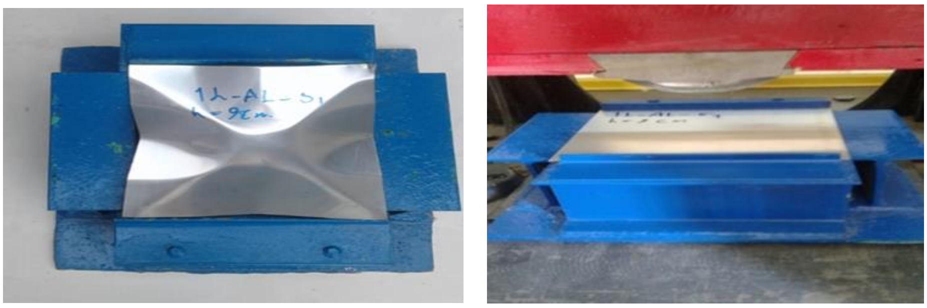
جدول ۵ نتایج حاصل از تست تجربی

نمونه	1L-AL-H=5cm	1L-AL-H=7cm	1L-AL-H=9cm	2L-AL-H=5cm	2L-AL-H=7cm	2L-AL-H=9cm
شتاب حداکثر (m/s^2)	۳٤/٦۹	۳۷/۱	٤۰/۰۲٤	٤۸/۱۳	۵۱/۹۳	۵۲/۱
تغییرشکل پلاستیک حداکثر (mm)	۳۵	۳۷	۵۵	۲۷	۳۱	۳٤



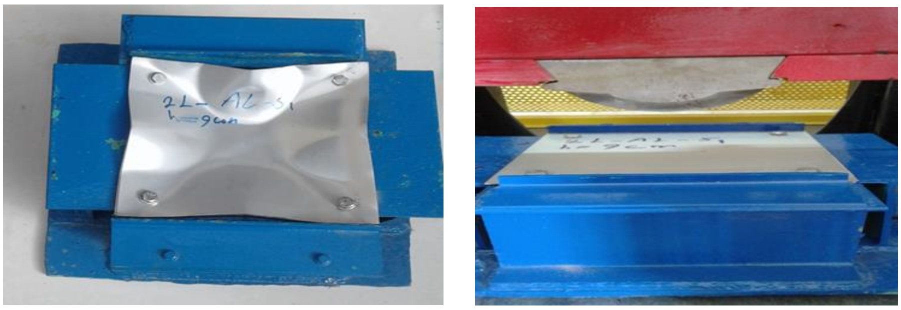
(الف)	(ب)

شکل ۷ الگوی تغییرشکل ورق‌ها. (الف) ورق یک لایه ارتفاع سقوط ۷ سانتی‌متر، (ب) ورق یک لایه ارتفاع سقوط ۹ سانتی‌متر



(الف)	(ب)

شکل ۸ ورق‌یک لایه آلومینیم با ازتفاع سقوط ۹ سانتی‌متر. (الف) قبل از برخورد، (ب) بعد از برخورد



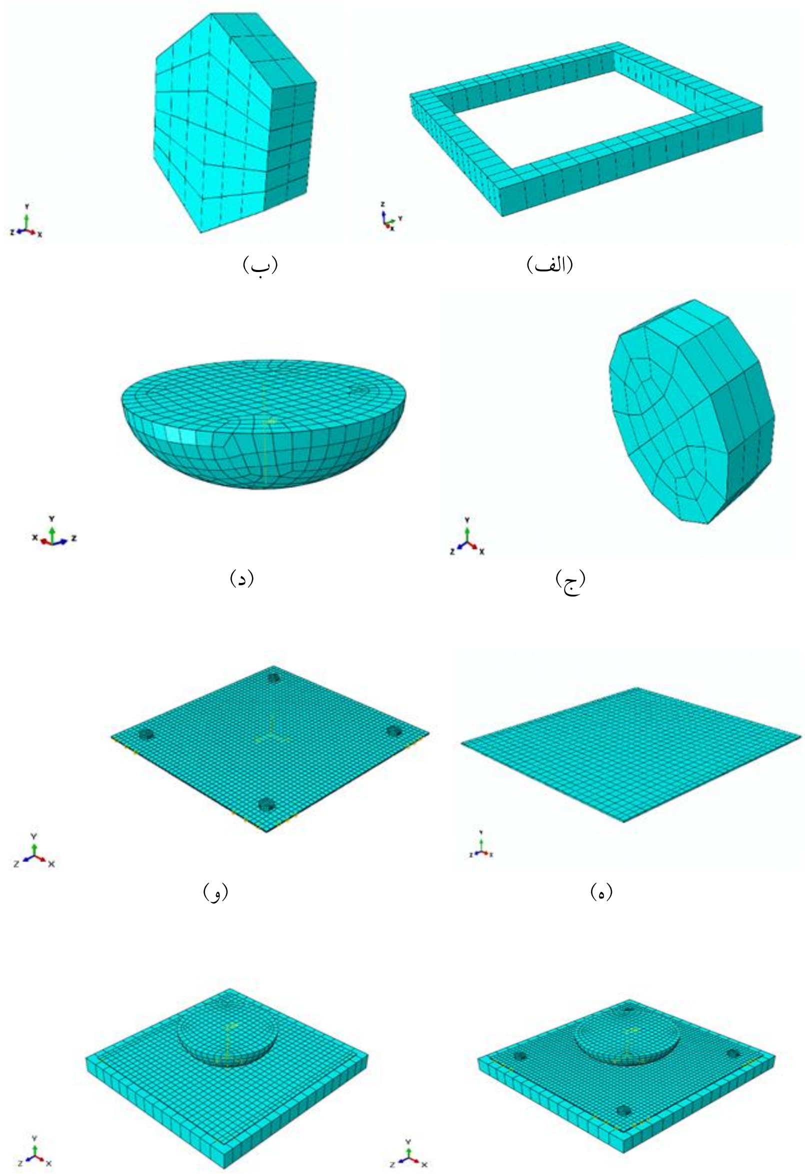
(الف)	(ب)

شکل ۹ ورق دولایه آلومینیوم ۳۱۰۵ با ازتفاع سقوط ۹ سانتی‌متر. (الف) هنگام برخورد، (ب) بعد از برخورد



(ب)	(الف)

شکل ۱۰ ورق دولایه آلومینیوم ۳۱۰۵ با ازتفاع سقوط ۷ سانتی‌متر. (الف) هنگام برخورد، (ب) بعد از برخورد



(ب)	(الف)

(د)	(ج)

(و)	(ه)

(ح)	(ز)

شکل ۱۱ مدل المان محدود، (الف) فیکسچر، (ب) سرپیچ، (ج) تنۀ پیچ، (د) ضربه‌زننده، (ه) ورق یک‌لایه، (و) ورق دولایه، (ز) مدل یک‌لایه، (ح) مدل دولایه

مدل‌سازی رفتار فولاد

نمودار تنش-کرنش آلومینیوم ۳۱۰۵ به‌دست‌آمده در آزمون کشش تک‌محوری (شکل ۳) به‌عنوان مشخصهٔ اصلی رفتار این مصالح در نظر گرفته شده است. محدودهٔ رفتار خطی به‌صورت الاستیک ایزوتروپیک با شیبی برابر با مدول یانگ تا نقطهٔ تنش تسلیم و ضریب پواسون ۰/۳۳ لحاظ شده است. در تغییرشکل‌های بزرگتر، مصالح فولادی وارد محدودهٔ رفتار با تغییرشکل ماندگار می‌شوند. برای تعریف مرحلهٔ پلاستیک از مدل پلاستیک ایزوتروپیک کلاسیک با تعریف تنش تسلیم در هر نقطه از نمودار در برابر کرنش پلاستیک استفاده گردیده است.

بارگذاری و شرایط مرزی

با توجه به این‌که ورق‌های فولادی به پهنای ۱ سانتی‌متر بر روی نشیمن‌گاه فیکسچر قرار می‌گیرند، در مدل‌سازی برای سادگی و ثابت نگه‌داشتن فیکسچر فقط سه درجه آزادی انتقالی در چهار لبه بسته شده است. برای شبیه‌سازی برخورد ضربه‌زننده از سرعت معادل در لحظهٔ شروع ضربه استفاده شده است که از برابر قرار دادن انرژی پتانسیل ضربه‌زننده در ارتفاع مورد نظر با انرژی جنبشی در لحظهٔ پیش از برخورد به‌دست می‌آید. بدین‌صورت برای سه ارتفاع سقوط خواهیم داشت:

$$v = \sqrt{2gh} = \begin{Bmatrix} h = 50mm & \rightarrow & v = 990\ mm/s \\ h = 70mm & \rightarrow & v = 117\ mm/s \\ h = 90mm & \rightarrow & v = 133\ mm/s \end{Bmatrix} \quad (۱)$$

$$v = \frac{\Delta a}{\Delta t} \qquad x = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (۲)$$

در رابطهٔ (۱) برای سه ارتفاع مختلف مقدار سرعت برخورد محاسبه می‌شود. در رابطهٔ (۲) داده‌های استخراجی از منحنی شتاب-زمان به جابه‌جایی-زمان پردازش می‌شود.

برای اعمال سرعت‌های اولیه به ضربه‌زننده، از قابلیت پیش‌تعریف بارگذاری (Predefined field) در نرم‌افزار ABAQUS استفاده شده است. براساس این قابلیت سرعت اولیه به نقطهٔ مرجع وارد می‌شود و برای ایجاد شرایط واقعی نیروی ثقل ۹۸۱۰ میلی‌متر بر مجذور ثانیه و جرم ضربه‌زننده که برابر با ۱۸۰ کیلوگرم می‌باشد وارد شده است. برای تعریف اندرکنش ضربه‌زننده با ورق‌های فولادی نیز از قابلیت تماس عمومی، استفاده شده است، که یک تماس کلی بین همهٔ عناصر موجود در مدل ایجاد می‌کند که در آن خصوصیت کلی اختصاص‌یافته برای تماس بین اجزاء از نوع تماس نرمال و تماس مماسی استفاده شده است.

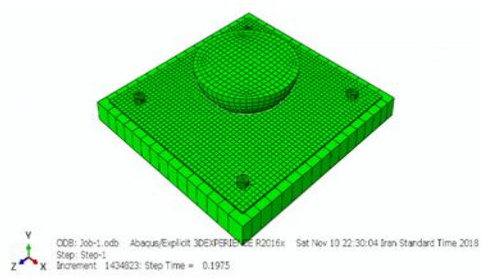
نتایج و بحث

مقایسهٔ نمودارهای شتاب- زمان و جابه‌جایی- زمان و نیرو- جابه‌جایی در تحلیل عددی و تجربی. پس از تعیین مش مناسب برای صفحهٔ فولادی، نمونه‌های آزمایشگاهی مختلف موجود در این تحقیق به‌وسیلهٔ روش مدل‌سازی ذکر شده شبیه‌سازی گردیدند. نتایج حاصل از این مدل‌سازی در جدول (٦) نمایش داده شده است. همچنین برای مقایسهٔ نتایج حاصل از دو تحقیق عددی و آزمایشگاهی در شکل (۱۲ -الف) ورق یک‌لایه و (ب) ورق دولایه و نتایج شتاب در شکل (۱۳-الف) ورق یک‌لایه و (ب) دولایه و شکل (١٤) نتایج نیرو-جابه‌جایی تست عددی آورده شده است. برای محاسبهٔ نمودار نیرو- جابه‌جایی باتوجه به اینکه فقط داده و نمودار مربوط به شتاب- زمان در اختیار ما بوده است، حاصل‌ضرب دادهٔ منحنی شتاب در جرم ضرب‌زننده مقادیر متناظر نیروی وارده به نمونهٔ آزمایشگاهی و عددی حاصل می‌گردد. به‌منظور محاسبهٔ منحنی نیرو- جابه‌جایی می‌بایست مقادیر جابه‌جایی متناظر با هر دادهٔ شتاب و نیرو را محاسبه نمود و از روی آن منحنی نیرو و جابه‌جایی نمونه‌ها را با استفاده از روش انتگرال‌گیری عددی سیمپسون، با

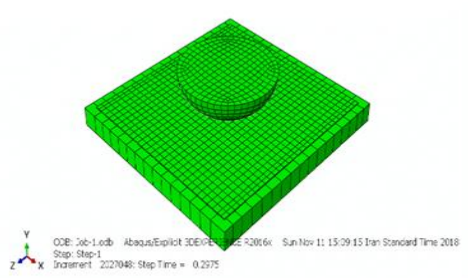
یک بار انتگرال‌گیری از داده‌های شتاب مقادیر سرعت برحسب زمان محاسبه کرد. طبق رابطهٔ (۲) و در ادامه با انتگرال‌گیری عددی از داده‌های مربوط به سرعت- زمان منحنی جابه‌جایی- زمان محاسبه می‌گردد.

جدول ٦ نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی

نمونه	1L-AL-H=5cm	1L-AL-H=7cm	1L-AL-H=9cm	2L-AL-H=5cm	2L-AL-H=7cm	2L-AL-H=9cm
شتاب حداکثر (m/s^2)	۳۵/۸۱	۳۷/۸۵	۳۹/۲۲	۵۰/۵۲	۵۲/٤۱	۵۳/۵۲
تغییرشکل پلاستیک حداکثر (mm)	۳۲	۳۳	٤۹	۲۵	۲۹	۳۲

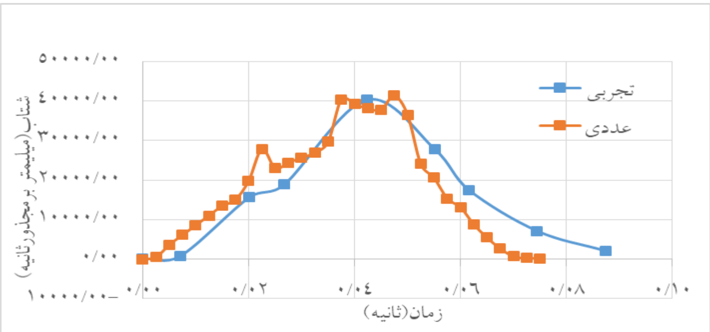


(الف)

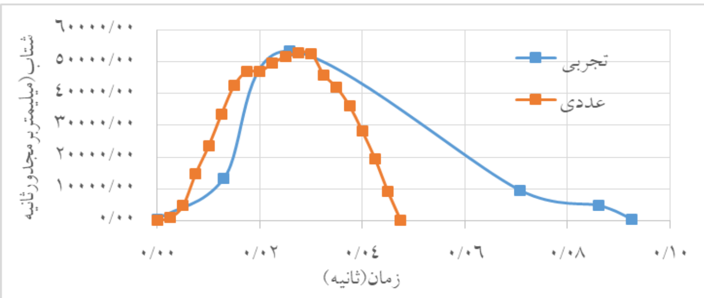


(ب)

شکل ۱۲ مدل المان محدود تست ضربهٔ سقوط آزاد. (الف) یک‌لایه، (ب) دولایه

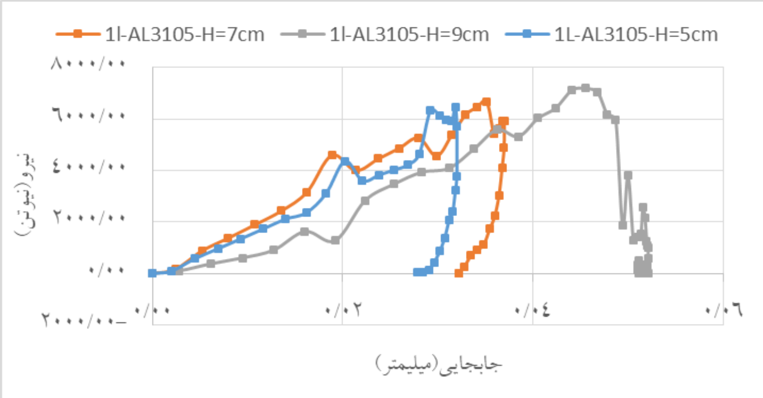


(الف)

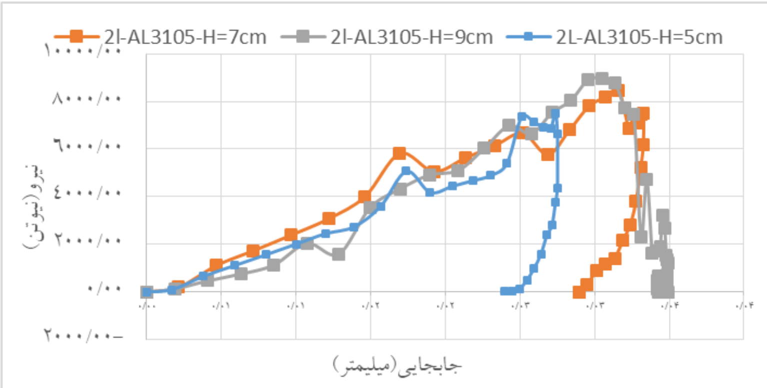


(ب)

شکل ۱۳ مقایسهٔ نتایج شتاب تست تجربی و مدل المان محدود. (الف) ورق یک‌لایه با ارتفاع سقوط ۹ سانتی‌متر، (ب) ورق دولایه با ارتفاع سقوط ۹ سانتی‌متر.



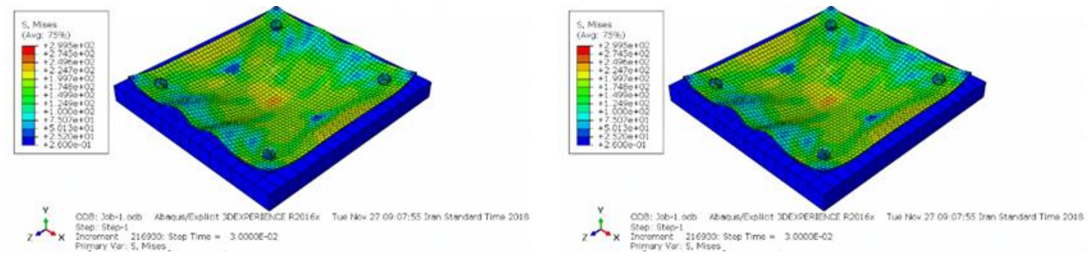
(الف)



(ب)

شکل ١٤ مقایسهٔ نتایج نیرو –جابه‌جایی مدل المان محدود، (الف) ورق یک‌لایه، (ب) ورق دولایه

نتایج عددی نیز همانند نمونه‌های آزمایشگاهی نشان می‌دهند که اضافه شدن لایه‌ها مقدار شتاب وارده به صفحهٔ آلومینیومی را افزایش می‌دهد اما به مقدار چشم‌گیری تغییرمکان ماندگار را کاهش می‌دهد. تفاوت بین مدل‌های آزمایشگاهی با شبیه‌سازی عددی بسیار کم و زیر ١٠ درصد می‌باشد که این مقدار به دلایلی همچون وجود اصطکاک بین یاتاقان‌های ضربه‌زننده و میله‌های نگهدارندهٔ وزنه، همچنین وجود میرایی می‌باشد، که در مدل عددی اعمال نشده است. البته باید در نظر داشت که شرایط تکیه‌گاهی و طریقهٔ متصل کردن ورق‌ها و خطای ساخت عامل مهمی در مقدار نتایج می‌باشند. در شکل (١٥) نمونه‌هایی از الگوی تغییرشکل ورق‌های یک‌لایه و دولایه نمایش داده شده است. همچنین در جدول (٧) نتایج به‌دست آمده برای جذب انرژی حاصل از تست عددی به‌صورت خلاصه ارائه شده است. دیده می‌شود که ورق‌های دولایه نسبت به ورق‌های یک‌لایه به‌طور میانگین با کاهش اندکی در حدود ١٦ درصد مواجه می‌شوند. در شکل (١٦–الف و ب) نمودارهای جابه‌جایی –زمان ورق‌ها نشان داده شده است. همان‌طور که دیده می‌شود، شکل نمودارها از الگوی یکسانی برخوردار هستند و نشان می‌دهد در لحظهٔ برخورد جابه‌جایی افزایش پیدا می‌کند اما در یک زمان متوقف می‌شود.

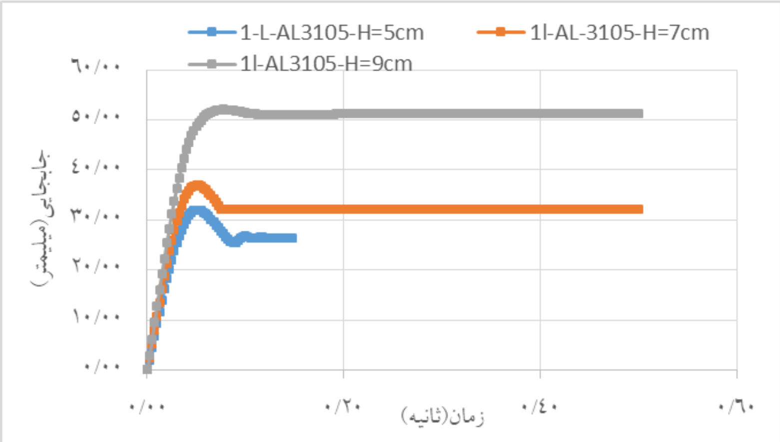


(الف) (ب)

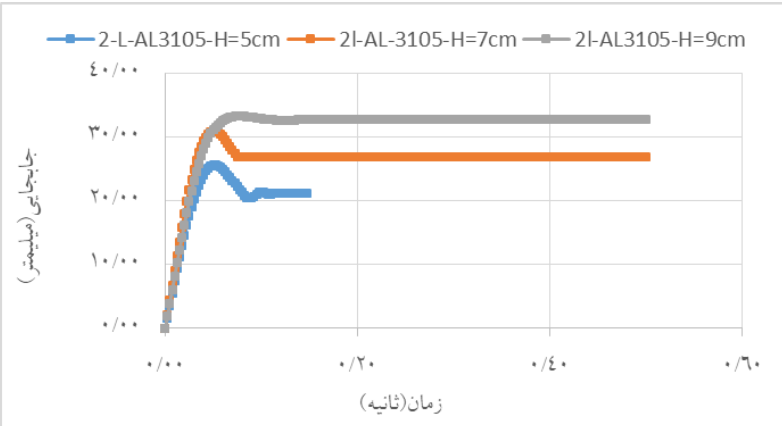
شکل ۱۵ الگوی تغییرشکل ورق‌ها در مدل المان محدود، (الف) ورق یک‌لایه، (ب) ورق دولایه

جدول ۷ نتایج مقدار جذب انرژی بر واحد جرم

نمونه	1L-AL-H=5	1L-AL-H=7cm	1L-AL-H=9cm	2L-AL-H=5cm	2L-AL-H=7cm	2L-AL-H=9cm
جذب انرژی (j)	٨٧	١٢٢	١٤٨	٧٥	١١٢	١٤٤



(الف)



(ب)

شکل ١٦ نمودارجابه‌جایی –زمان، (الف) ورق یک‌لایه، (ب) ورق دولایه

نتیجه‌گیری

در ایــن پــژوهش بررســی آزمایشــگاهی و المــان محدودی روی رفتار ورق‌های آلومینیـوم ۳۱۰۵ کـه بـا لایه‌چینی ۱و ۲ لایه با پیچ به‌هم متصـل شـده و تحـت ضربه با سرعت پایین ناشی از سـقوط آزاد وزنـه قـرار گرفته‌اند، انجام شد.

بـر اسـاس نتـایج بـه‌دسـت‌آمـده از ایـن تحقیـق، ورق‌های دولایه نسـبت بـه ورق‌هـای یـک‌لایـه دارای شتاب و نیروی ضربهٔ بیشتری می‌باشند؛ لذا اثر شوک و ضربهٔ وارده در اثر برخورد در این ورق‌ها بیشتر اسـت. با این وجود جابه‌جایی در این ورق‌هـا کمتـر و جـذب انرژی نیز کمتر اسـت. مقایسـهٔ نمودارهـای حاصـل از تحلیل عددی و آزمایشگاهی نشان می‌دهند که اختلاف ماکزیمم شتاب وارد بر ورق کمتر از ۸ درصد می‌باشد. همچنین تفاوت نتایج تغییرشـکل مانـدگار کمتـر از ۱۰ درصد است که نشان از دقت مناسب و نزدیک بـه‌هـم این دو روش تحلیل دارد.

واژه‌نامه

پیش‌تعریف بارگذاری	Predefined field
تغییرشکل‌پذیر	Deformable
جامد	Solid
قابلیت تماس عمومی	General contact explicit
مصالح صلب	Discrete rigid
نقطهٔ مرجع	Reference point

مراجع

1. Qian, Y. and Swanson, S.R., "A Comparison of Solution Techniques for Impact Response of Composite Plates", *Composite Structures*, Vol. 14, pp. 177-192, (1990).
2. Her, S.C. and Liang, Y.C., "The Finite Element Analysis of Composite Laminates and Shell Structures Subjected to Low Velocity Impact", *Composite Structures*, Vol. 66, pp. 277-285, (2004).
3. Caprino, G., Spataro, G. and Del Luongo, S., "Low- Velocity Impact Behavior of Fiberglass-Aluminum Laminates", *Composites: Part A*, Vol. 35, pp 605-616, (2004).
4. Roy, P.K. and Ganesan, N., "Dynamic Stress Analysis of a Tapered Cantilever Square Plate Under Impact Load", *Computer & Structures*, Vol. 49, No. 2, pp. 275-281, (1993).
5. Sabouri, H., Ahmadi, H. and Liaghat, G.H., "Ballistic, Impact Perforation Into Glare Target: Experiment Numerical Modeling and Investigation of Aluminium Stacking Sequence", *International Journal Vehicle Structures & Systems*, Vol. 3, No. 1, pp. 178-183, (2011).
6. Kitada, T., "Ultimate strength and ductility of concrete-filled steel bridge piers", *Engineering Structures*, Vol. 20, Nos. 4~i, pp. 347-354, (1998).
7. Olsson, R., "Improved Theory for Contact Indentation of Sandwich Panels", *Journal of AIAA* Vol. 34, No. 6, pp.1238-1244, (1996).
8. Ustaa, F., Mullaoglu, F., Türkmen, H.S., Balkan, D., Mecitoglu, Z., Kurtaran, H. and Akay, E., "Effects of Thickness and Curvature on Impact Behaviour of Composite Panels", *Journal of Procedia Engineering*, No. 167, pp. 216-222, (2016).
9. Zhang, L.W., Song, Z.G., Qiao, P. and Liew, K.M., "Modeling of Dynamic Responses of CNT-Reinforced Composite Cylindrical Shells Under Impact", *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 313, pp. 889-903, (2016).
10. Choubini, M., Liaghat, Gh.H. and Hossein Pol, M., "Investigation of energy absorption and deformation of thin walled tubes with circle and square section geometries under transverse impact loading", Modares Mechanical Engineering, Vol. 15, No. 1, pp. 75-83, (2015). (In Persian).

11. Malvern, L.E., Sierakowski, R.L., Ross, C.A. and Cristescu, N., "Impact Failure Mechanisms in Fiber-Reinforced Composite Plates", *High Velocity Deformation of Solids*, pp. 120-131,(1975).
12. Bidi, A. Liaghat, Gh. and Rahimi, Gh, "Experimental and numerical analysis of impact on curved steel- polyurea bi-layer panels", *Journal of Science and Technology of Composites*, Vol. 3, No. 3, pp. 207-214, (2016). (In Persian).
13. Olsson, R., "Improved Theory for Contact Indentation of Sandwich Panels", *Journal of AIAA*, Vol. 34, No. 6, pp. 1238-1244, (1996).
14. Choi, I.H. and Hong, C.S., "New Approach for Simple Prediction of Impact Force History on Composite laminates", *Journal of AIAA*, Vol. 132, No. 10, pp. 2072-272, (1994).
15. Hatami, H. and Fatholahi, A.B., "The theoretical and numerical comparison and investigation of the effect of inertia on the absorbent collapse behavior of single cell and two-cell reticular under impact loading", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 50, pp. 51-60, (2017)
16. Ghodsbin Jahromi, A. and Hatami, H., "Numerical Behavior Study of Expanded Metal Tube Absorbers and Effect of Cross Section Size and Multi-Layer under Low Axial Velocity Impact Loading", *Amirkabir Journal of Mechanical Engineering*, Vol. 49, pp. 685-696, (2018).
17. Hatami, H. and Hossein, M., "Elastic-Plastic Analysis of Bending Moment–Axial Force Interaction in Metallic Beam of T-Section", *Journal of Applied and Computational Mechanics*, Vol. 5, pp. 162-173, (2019).
18. Hatami, H., Hosseini, M. and Yasuri, A.K., "Perforation of Thin Aluminum Targets Under Hypervelocity Impact of Aluminum Spherical Projectiles", *Materials Evaluation*, Vol. 77, pp. 411-422, (2019).
19. Rad, M.S., Hatami, H., Alipouri, R., Nejad, A.F. and Omidinasab, F., "Determination of energy absorption in different cellular auxetic structures", *Mechanics & Industry*, Vol. 20, pp. 302-317, (2019).